

LARSIM-Anwendertreffen 2011

Modellierung des Schnees im Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Berechnung der potentiellen Schneeschmelze

Kai Gerlinger & Ingo Haag

HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz



Schneemodellierung in LARSIM

Betrachtete Teilprozesse bei der Schneemodellierung in LARSIM:

1. Potentielle Schneeschmelze durch Wärme und Strahlung
2. Akkumulation von Schnee
3. Setzung (Kompaktion) der Schneedecke als Folge des zunehmenden Anteils von flüssigem Wasser
4. Aktuelle Schneeschmelze in Abhängigkeit vom Anteil des flüssigen Wassers innerhalb der Schneedecke

Überblick Schnee-Optionen

**Abfluss-
bildung**



Schneedecke

Energiebilanz

Setzung und Schmelze

SCHNEE: KNAUF, VER.
SCHNEE: KNAUF, ERW.
SCHNEE: OBERFL-TEMP

SNOW-COMPACTION
SNOW-COMPACTION UEB

SCHNEE: KNAUF, 2006
SCHNEEALBEDO

SNOW-COMPACTION 2

BODENTEMPERATUR
(FROST-VERSIEGEL-FAK)

*MAX. SCHNEE-RET. TAPE35
EINGABE KNAUF-PARAMETER*

Überblick Schnee-Optionen

**Abfluss-
bildung**



Schneedecke

Energiebilanz

Setzung und Schmelze

SCHNEE: KNAUF, VER.
SCHNEE: KNAUF, ERW.
SCHNEE: OBERFL-TEMP

SNOW-COMPACTION
SNOW-COMPACTION UEB

SCHNEE: KNAUF, 2006
SCHNEEALBEDO

BODENTEMPERATUR
(FROST-VERSIEGEL-FAK)

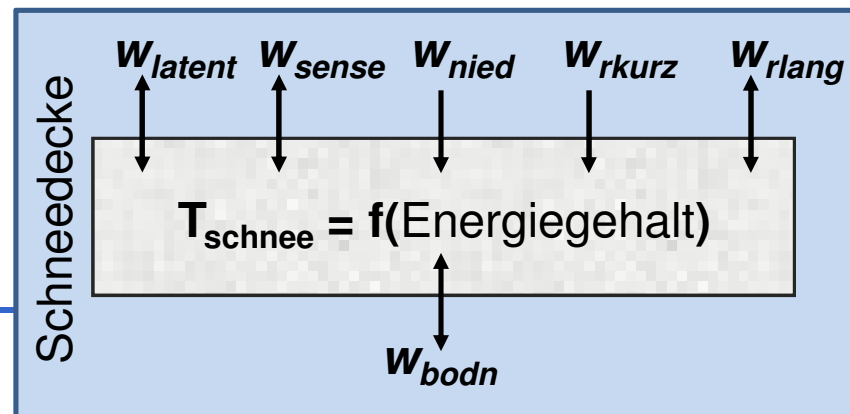
EINGABE KNAUF-PARAMETER

Potentielle Schneeschmelze

Energiebilanzgleichung:

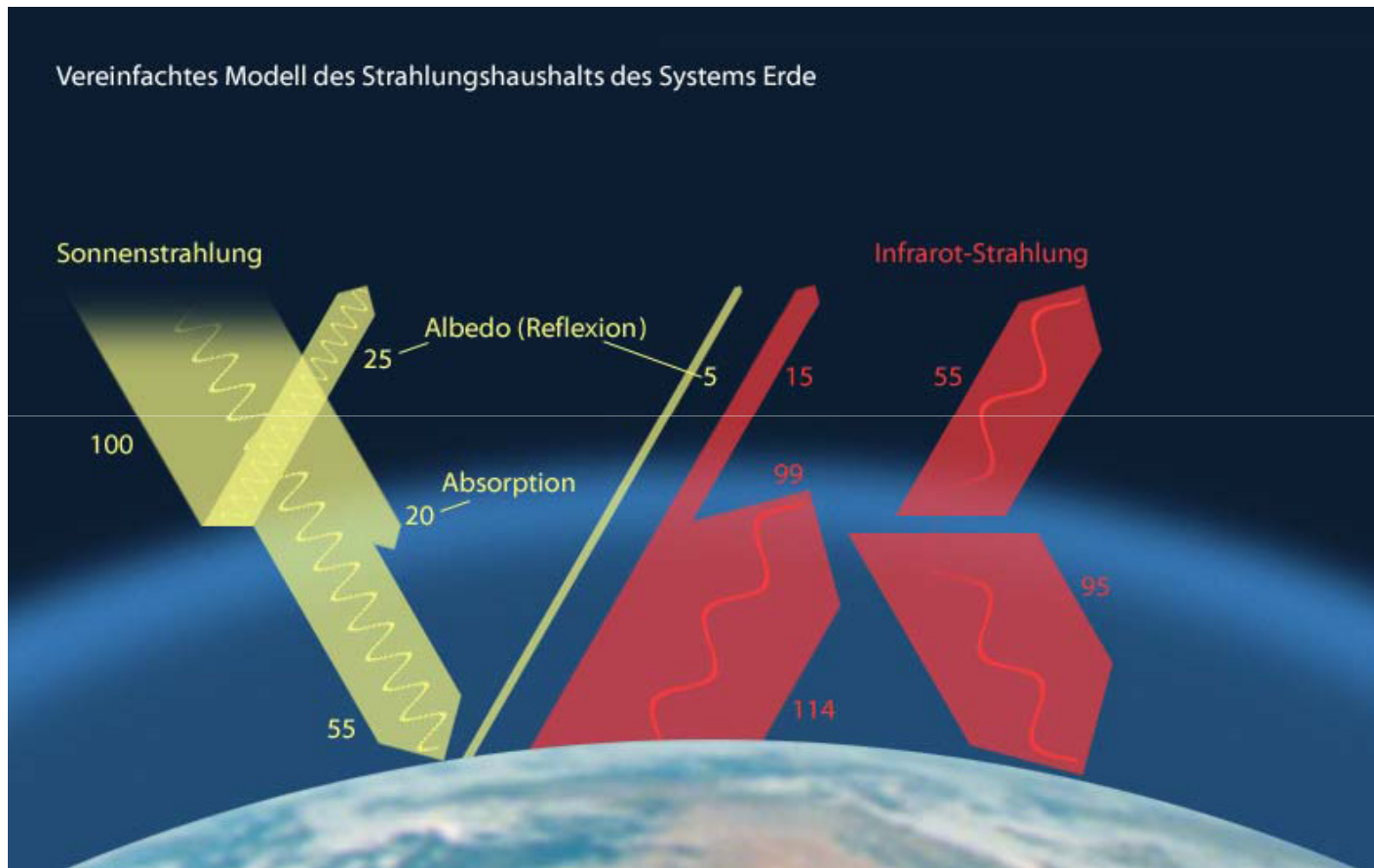
$$W_{input} = W_{bodn} + W_{nied} + W_{rkurz} + W_{rlang} + W_{sense} + W_{latent}$$

W_{input}	$[W/m^2]$	Energiebilanz der Schneedecke
W_{bodn}	$[W/m^2]$	Bodenwärmestrom
W_{nied}	$[W/m^2]$	Wärmestrom durch Niederschlag
W_{rkurz}	$[W/m^2]$	Kurzweilige Strahlungsbilanz
W_{rlang}	$[W/m^2]$	Langweilige Strahlungsbilanz
W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
W_{latent}	$[W/m^2]$	Strom latenter Wärme (Verdunstung, Kondensation, Sublimation)



Potentielle Schneeschmelze

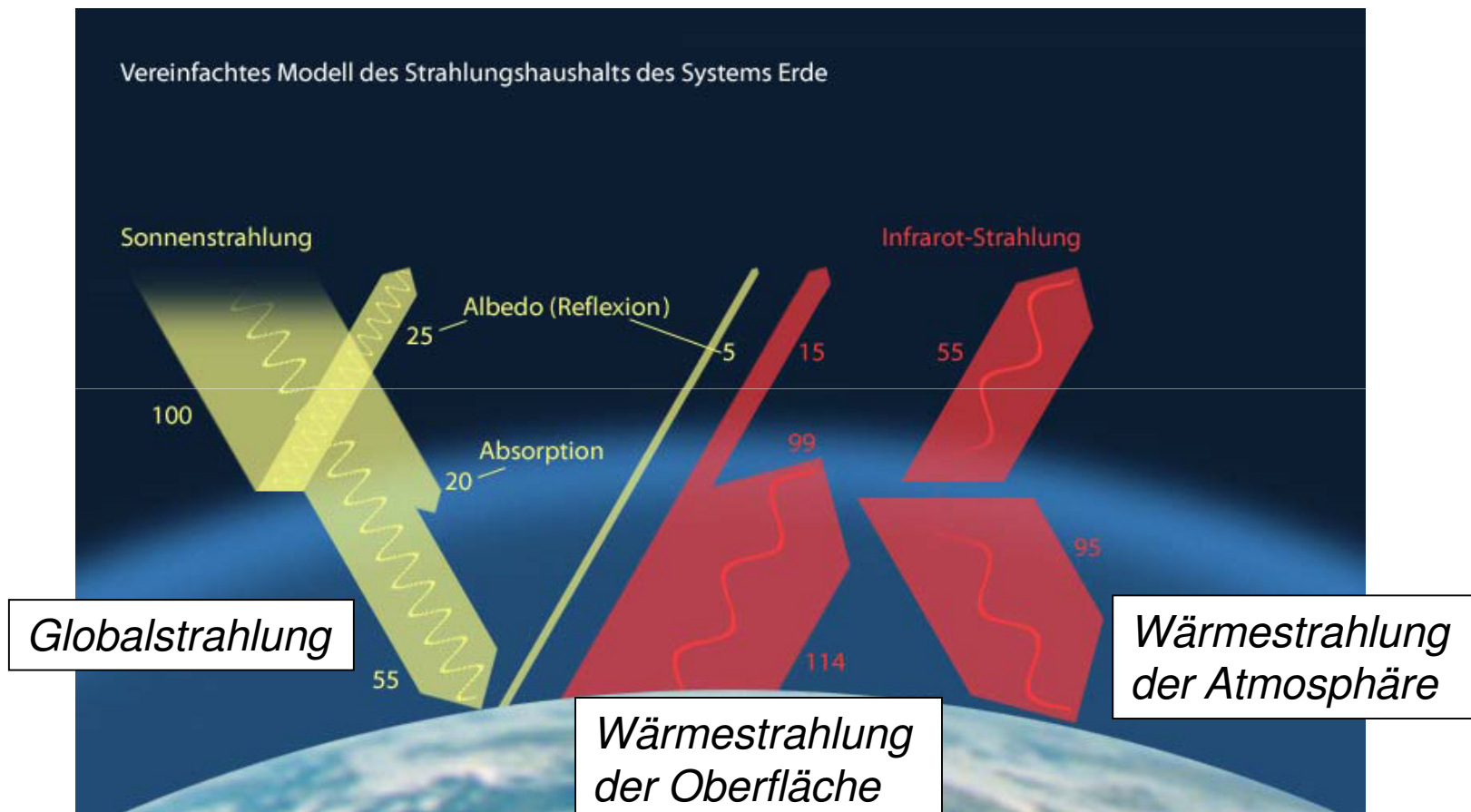
Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:



Die Zahlen geben die zeitlich und räumlich gemittelten Energiestromdichte relativ zur Sonnenstrahlung an; der Wert 100 entspricht 342 W/m^2

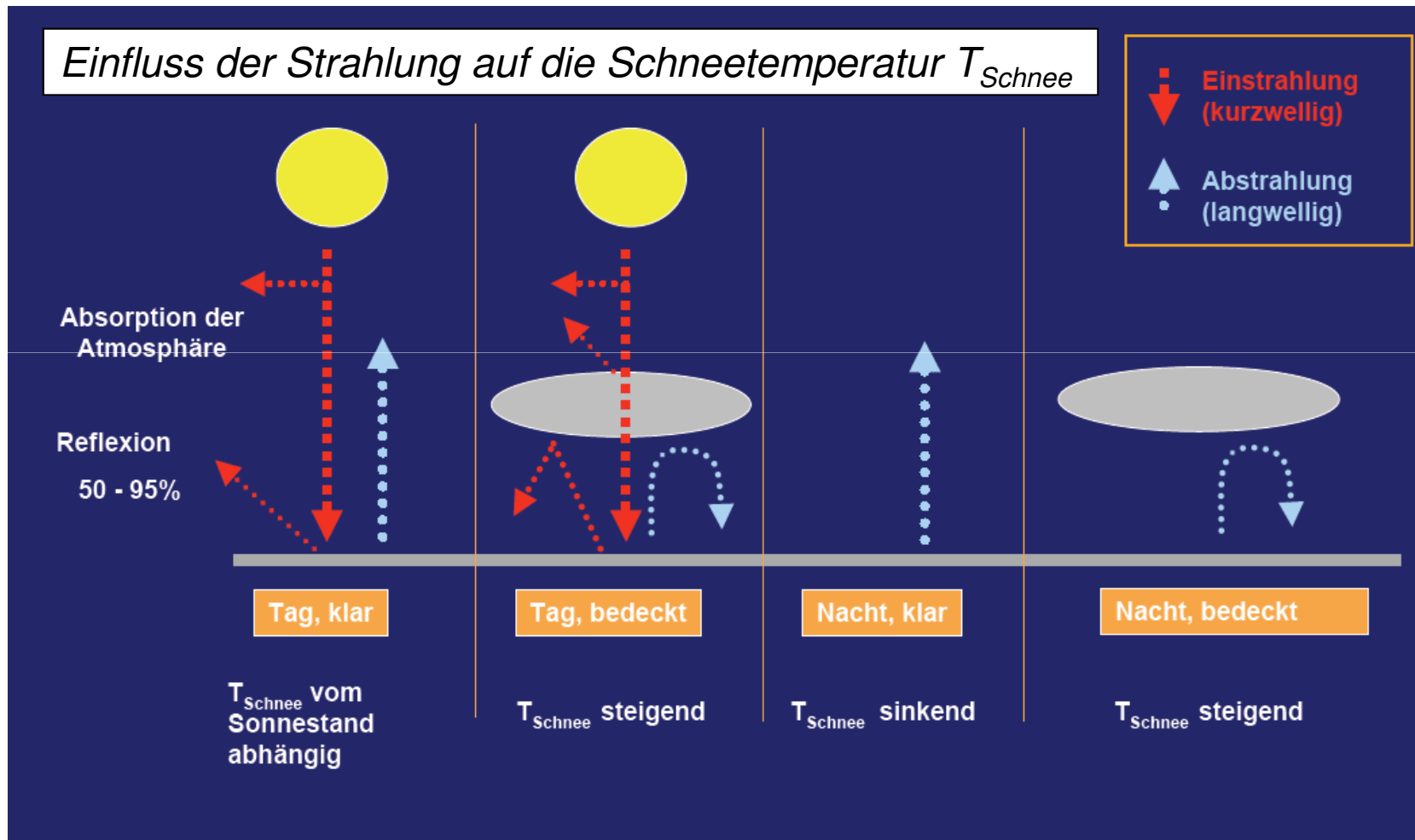
Potentielle Schneeschmelze

Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:



Potentielle Schneeschmelze

Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:



Bergplus 2011

Potentielle Schneeschmelze

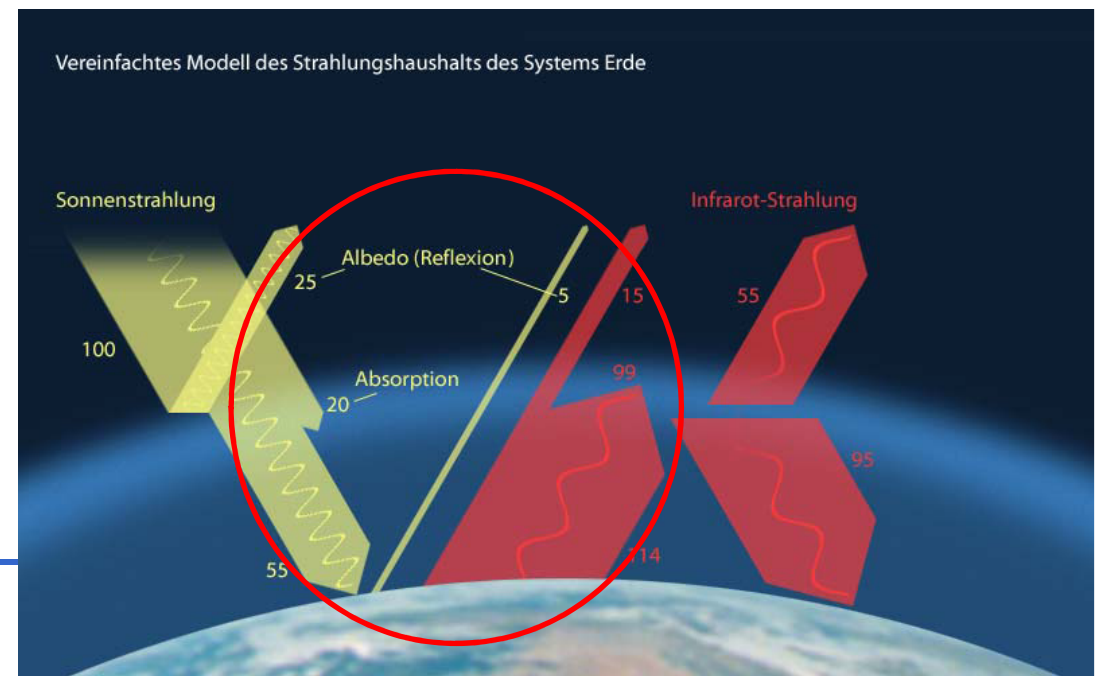
Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:

Langwellige und kurzwellige Strahlung tragen zur Schneeschmelze bei. Auch bei bewölktem Himmel nimmt der Schnee Energie durch die langwellige Strahlung auf.

Schnee absorbiert:

- 10 bis 50 % der kurzwelligen Strahlung
- 99 % der langwelligen Strahlung

Ein Großteil der kurzwelligen Strahlung wird an der Schnee-Schneeoberfläche reflektiert. Die oberflächenabhängige, kurzwellige Reflexionszahl heißt Albedo. Die Schneeralbedo verändert sich bei Alterung der Schneedecke.



Potentielle Schneeschmelze

Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:

Langwellige und kurzwellige Strahlung tragen zur Schneeschmelze bei. Auch bei bewölktem Himmel nimmt der Schnee Energie durch die langwellige Strahlung auf.

Schnee absorbiert:

- 10 bis 50 % der kurzwelligen Strahlung
- 99 % der langwelligen Strahlung

Ein Großteil der kurzwelligen Strahlung wird an der Schnee-Schneeoberfläche reflektiert. Die oberflächenabhängige, kurzwellige Reflexionszahl heißt Albedo. Die Schneecalbedo verändert sich bei Alterung der Schneedecke.

Schneeform	Albedo
Neuschnee, fein, flockig	etwa 90%
Neuschnee, körnig	80%
Altschnee, je nach Verunreinigung	45-75%
Firn, rein	55%
Gletschereis , stark verschmutzt	13%

Potentielle Schneeschmelze

1) Dynamische Berechnung der Albedo als Funktion der Alterung der Schneedecke:

Alterung der Schneeoberfläche (Abnahme der Albedo) durch drei Alterungsfaktoren r empirisch vereinfacht abgebildet (Option SCHNEEALBEDO):

Umkristallisation durch Diffusion:

$$r_1 = \exp\left(5000 \cdot \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{273,15 + T_{Schnee}}\right)\right)$$

Schmelzen und Wiedergefrieren:

$$r_2 = \mathit{Min}\left\{\begin{matrix} r_1^{10} \\ 1 \end{matrix}\right\}$$

Staub-Deposition: $r_3 = 0.03$

→ Dimensionsloses Alter τ der Schneeoberfläche:

$$\tau = \tau + \left(\frac{r_1 + r_2 + r_3}{10^6} \cdot 3600 \cdot ta\right)$$

Potentielle Schneeschmelze

1) Dynamische Berechnung der Albedo als Funktion der Alterung der Schneedecke:

Neuschnee verringert „Schneealter“ bzw. setzt dieses zurück auf 0:

$$\tau = \mathbf{Max} \left\{ \begin{array}{l} \tau \cdot (1 - 0,1 \cdot W\ddot{A}_{Neuschnee}) \\ 0 \end{array} \right\}$$

$W\ddot{A}_{Neuschnee}$ [mm] *Wasseräquivalent des trockenen Schnees*

Somit reicht Neuschnee mit einem Wasseräquivalent von 10 mm aus, um τ wieder auf Null zu setzen.

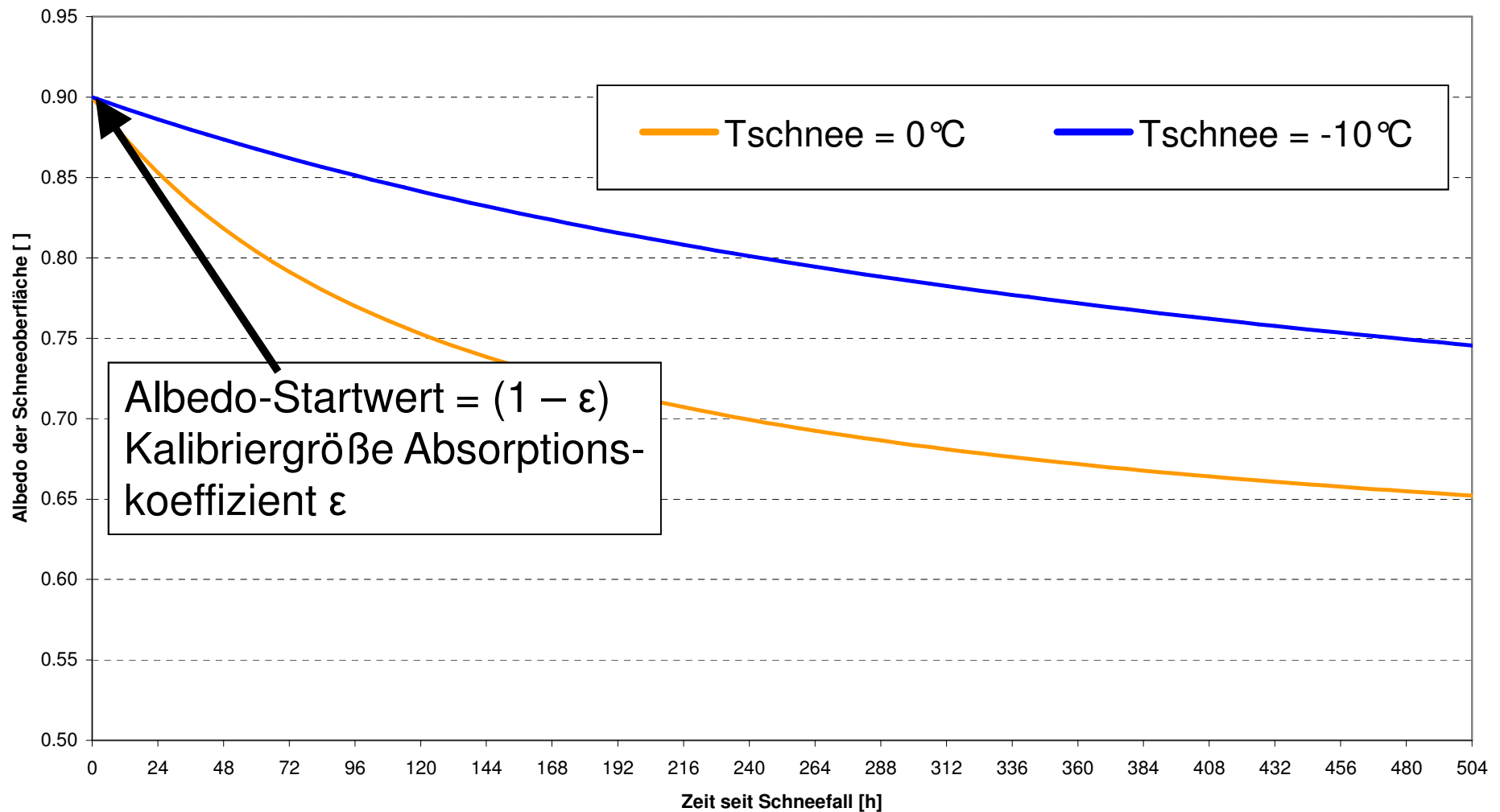
Albedo ergibt sich aus „Schneealter“:

$$\alpha_{Schnee} = \left(1 - C_v \cdot \frac{\tau}{1 + \tau} \right) \cdot \alpha_0$$

Alterungsfaktor C_v für $R_{Glob} = 0,35$

Potentielle Schneeschmelze

Abnahme der Albedo vor allem Funktion der Schneetemperatur:

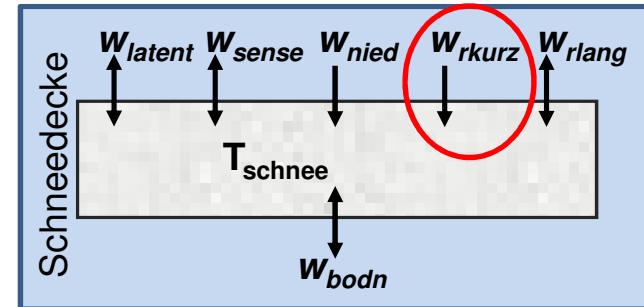


Potentielle Schneeschmelze

2) Kurzwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{r\text{kurz}} = \varepsilon \cdot R_{\text{Glob}}$$

$W_{r\text{kurz}}$	$[W/m^2]$	Kurzwellige Strahlungsbilanz
R_{Glob}	$[W/m^2]$	Globalstrahlung (aus Messung)
ε	$[-]$	Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung (Kalibriergröße Abso: Albedo = $1 - \varepsilon$), Wertebereich nach Knauf (1980) zwischen 0,02 und 0,6

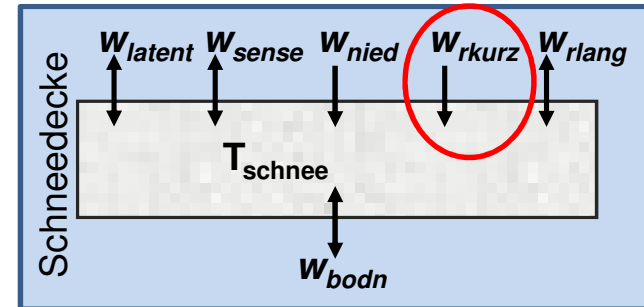


Potentielle Schneeschmelze

2) Kurzwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{r\text{kurz}} = \varepsilon \cdot R_{\text{Glob}}$$

$W_{r\text{kurz}}$	$[W/m^2]$	Kurzwellige Strahlungsbilanz
R_{Glob}	$[W/m^2]$	Globalstrahlung (aus Messung)
ε	$[-]$	Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung (Kalibriergröße <i>Abso</i> : $\text{Albedo} = 1 - \varepsilon$), Wertebereich nach Knauf (1980) zwischen 0,02 und 0,6



Der Absorptionskoeffizient *Abso* wird in LARSIM standardmäßig auf 0,3 gesetzt. Bei Option <EINGABE KNAUF-PARAMETER> kann der Absorptionskoeffizient als Kalibriergröße verwendet werden. Bei Option SCHNEEALBEDO wird durch *Abso* die Albedo der Neuschneedecke (ohne Alterung) definiert.

Bei Waldstandorten wird die kurzwellige Strahlungsbilanz zusätzlich durch die Vegetationsabschattung beeinflusst.

Potentielle Schneeschmelze

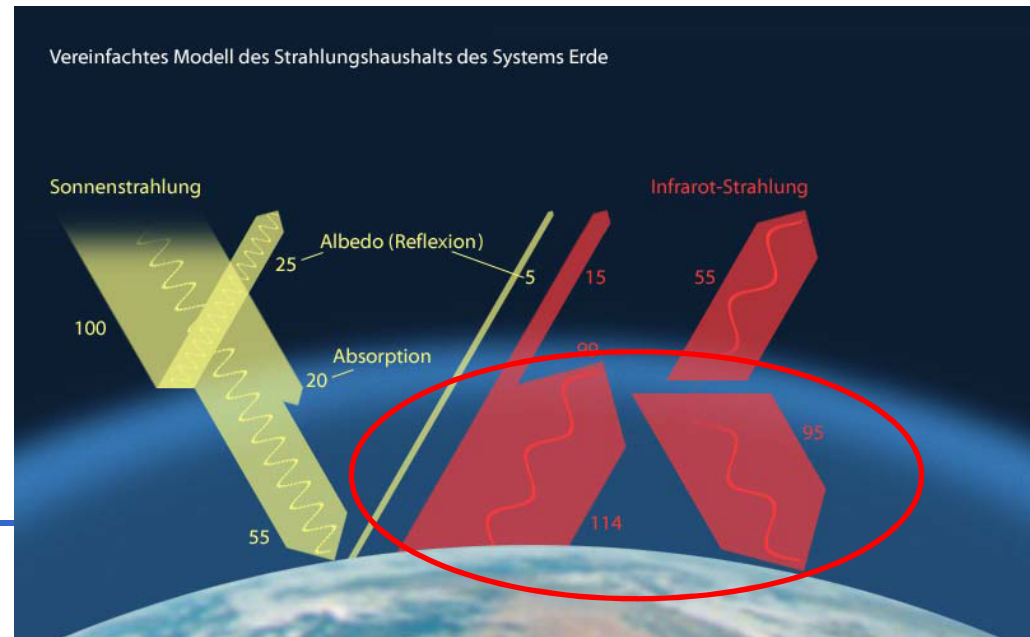
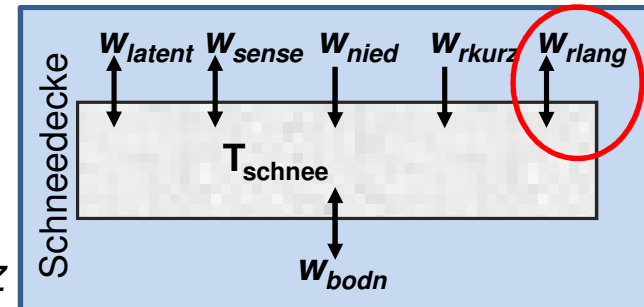
3) Langwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{rlang} = R_{Atm} - R_{Schnee}$$

W_{rlang} [W/m²] Langwellige Strahlungsbilanz

R_{Atm} [W/m²] Wärmestrahlung der Atmosphäre (Gegenstrahlung)

R_{Schnee} [W/m²] Wärmestrahlung der Schneedecke



Potentielle Schneeschmelze

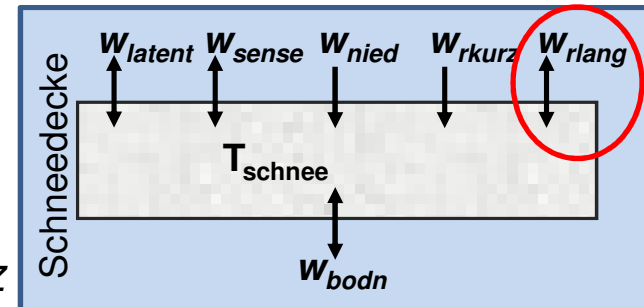
3) Langwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{rlang} = R_{Atm} - R_{Schnee}$$

W_{rlang} [W/m²] Langwellige Strahlungsbilanz

R_{Atm} [W/m²] Wärmestrahlung der Atmosphäre (Gegenstrahlung)

R_{Schnee} [W/m²] Wärmestrahlung der Schneedecke



Berechnung der Gegenstrahlung analog zum LARSIM-Verdunstungsmodell:

$$R_{Atm} = 1,28 \cdot \sigma \cdot (T_{Luft} + 273,15)^4 \cdot \left(\frac{e_{scr}}{T_{Luft} + 273,15} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot (1 + 0,22 \cdot r_{bewoe}^2)$$

R_{Atm} [W/m²] Wärmestrahlung der Atmosphäre (Gegenstrahlung)

σ [W/(m² K⁴)] Stefan-Boltzmann-Konstante (= 5,67 × 10⁻⁸ W/(m² K⁴))

e_{scr} [hPa] Wasserdampfdruck der Luft (ermittelt aus rel. Feuchte)

r_{bewoe} [-] Bewölkungsgrad (0 – 1; mittlerer Tageswert, ermittelt aus gemessener zu möglicher Globalstrahlung)

Potentielle Schneeschmelze

3) Langwellige Strahlungsbilanz:

Die Abstrahlung der Schneedecke wird mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gleichung aus der Temperatur der Schneedecke ermittelt:

$$R_{\text{Schnee}} = \sigma \cdot (T_{\text{Schnee}} + 273,15)^4$$

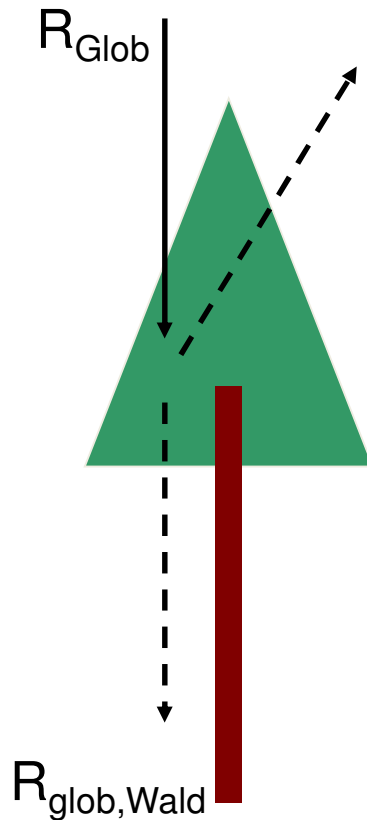
R_{Schnee}	$[W/m^2]$	<i>Wärmestrahlung der Schneedecke</i>
T_{Schnee}	$[^{\circ}C]$	<i>Temperatur der Schneedecke</i>
σ	$[]$	<i>Emissionskoeffizient (Annahme: Schnee wirkt im langwelligem Bereich wie ein schwarzer Strahler (DWD 1987) → kein Emissionskoeffizient (bzw. σ gleich 1))</i>

Sowohl die kurzwellige wie auch die langwellige Strahlungsbilanz werden an Waldstandorten durch die Abschattung und die Wärmestrahlung der Vegetation beeinflusst.

Potentielle Schneeschmelze

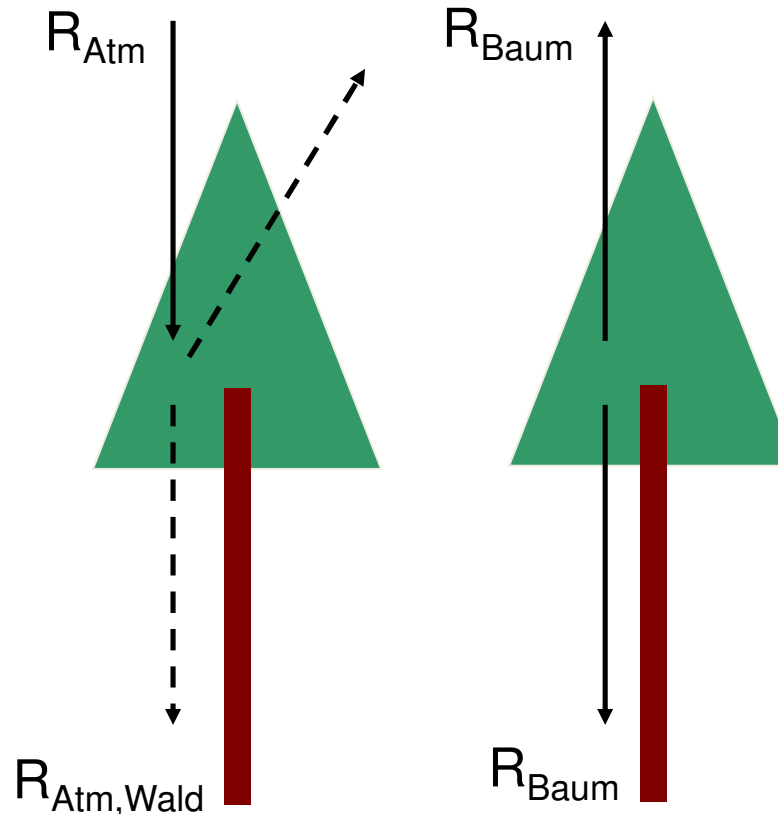
Einfluss Wald: Abschattung der Strahlung und Wärmestrahlung der Bäume

Kurzwellig



$$F_{Strahl} \cdot R_{Glob, Freiland}$$

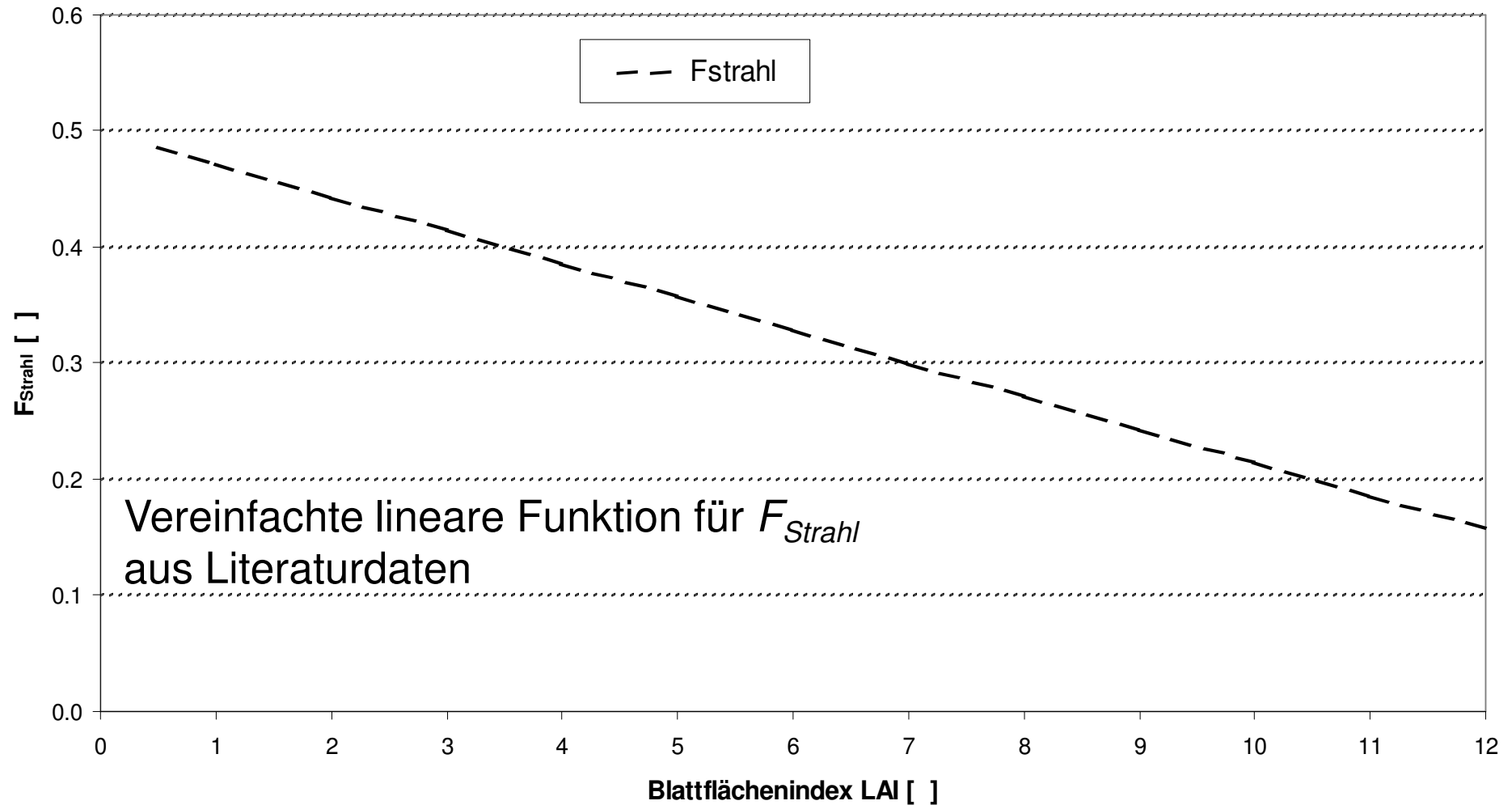
Langwellig



$$F_{Strahl} \cdot R_{Atm} + (1 - F_{Strahl}) \cdot 0,97 \cdot \sigma \cdot (T_L + 273,15)^4$$

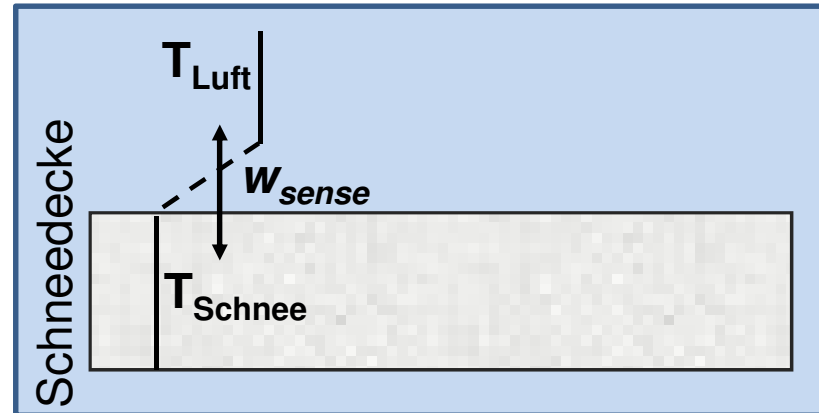
Potentielle Schneeschmelze

Einfluss Wald: Abschattung der Strahlung und Wärmestrahlung der Bäume



Potentielle Schneeschmelze

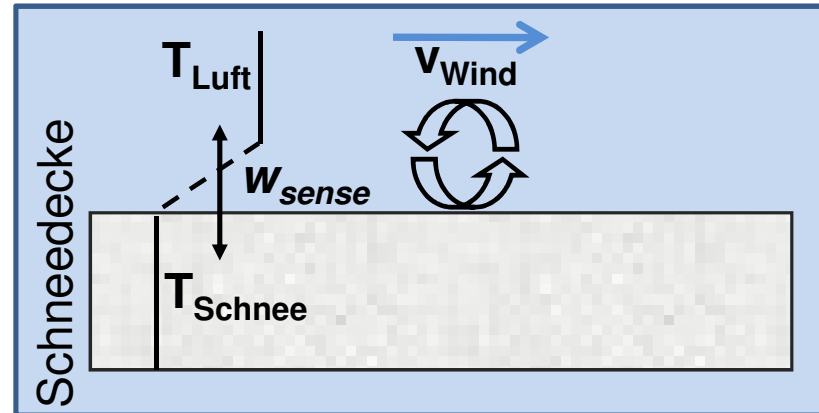
4) Turbulenter Strom fühlbarer Wärme:



W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
T_{Schnee}	$[^{\circ}C]$	Temperatur der Schneedecke
T_{Luft}	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur

Potentielle Schneeschmelze

4) Turbulenter Strom fühlbarer Wärme:



W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
T_{Schnee}	$[^{\circ}C]$	Temperatur der Schneedecke
T_{Luft}	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur
v_{Wind}	$[m/s]$	Windgeschwindigkeit

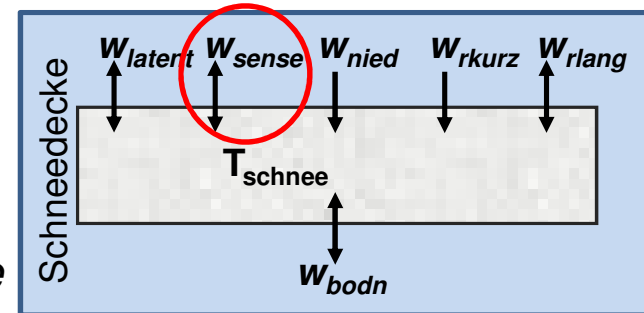
Aerodynamischer Ansatz mit Transferkoeffizient = $f(v_{\text{wind}})$

Potentielle Schneeschmelze

4) Turbulenter Strom fühlbarer Wärme:

$$W_{sense} = (a_0 + a_1 \cdot v_{Wind}) \cdot (T_{Luft} - T_{Schnee})$$

W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
v_{Wind}	$[m/s]$	Windgeschwindigkeit (aus Messung)
a_0	$[W/(m^2 \text{ } ^\circ C)]$	Konstante im turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,5 - 3,5 $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
a_1	$[J/(m^3 \text{ } ^\circ C)]$	Konstante zur Berechnung des windabhängigen Terms des turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,8 - 2,5 $J/(m^3 \text{ } ^\circ C)$

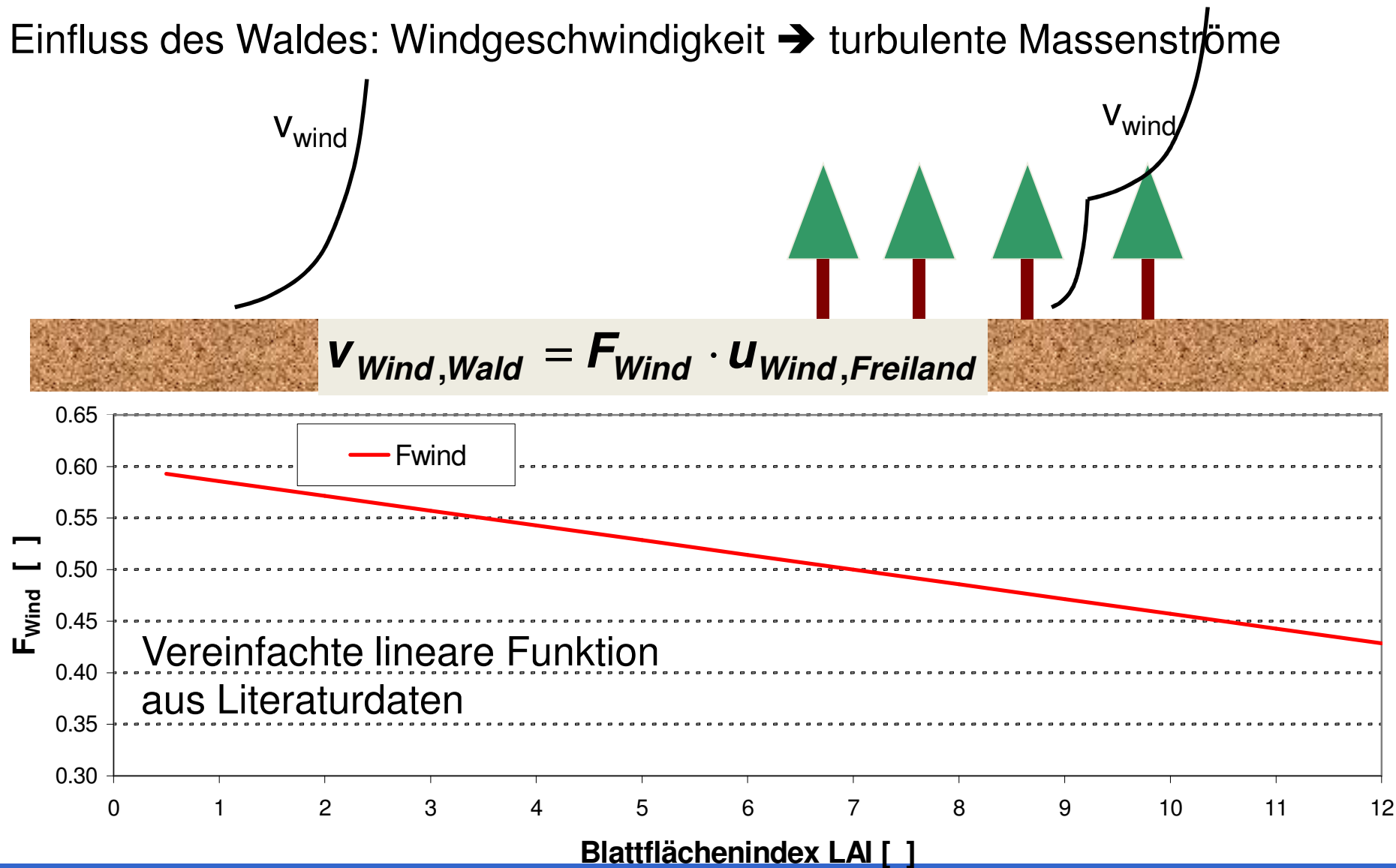


Die Konstanten a_0 und a_1 werden in LARSIM standardmäßig auf 2,0 und 1,6 gesetzt. Bei Option <EINGABE KNAUF-PARAMETER> können sie als Kalibriergrößen verwendet werden.

Der windabhängige turbulente Wärmeaustausch an der Schneeoberfläche wird bei Waldstandorten durch die Verringerung der Windgeschwindigkeit abgeschwächt. Dies wird über den Windfaktor F_{wind} berücksichtigt.

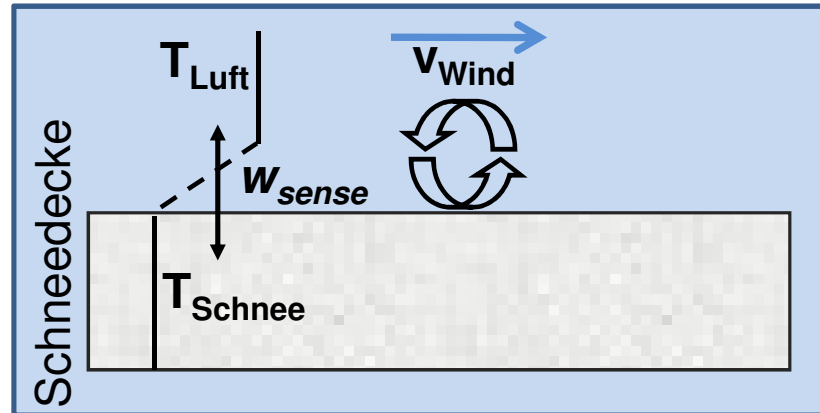
Potentielle Schneeschmelze

Einfluss des Waldes: Windgeschwindigkeit → turbulente Massenströme

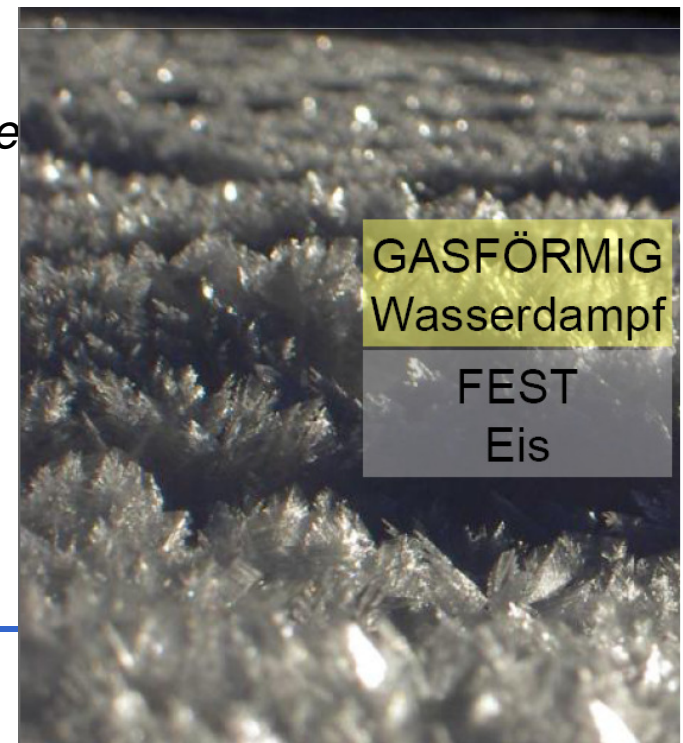


Potentielle Schneeschmelze

4) Turbulenter Strom fühlbarer Wärme:

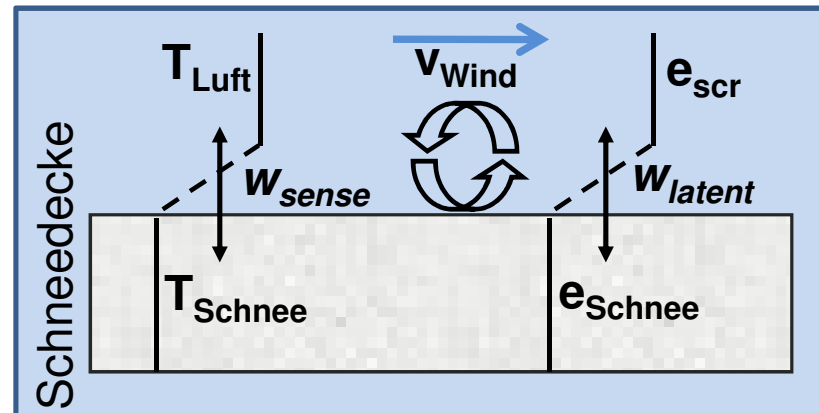


W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
T_{Schnee}	$[^{\circ}C]$	Temperatur der Schneedecke
T_{Luft}	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur
v_{Wind}	$[m/s]$	Windgeschwindigkeit



Potentielle Schneeschmelze

4) Turbulenter Strom fühlbarer und latenter Wärme:

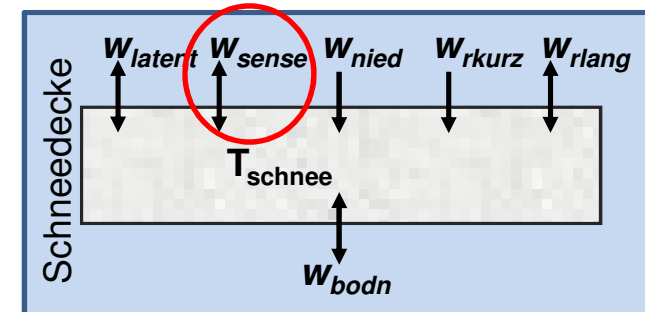


w_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
T_{Schnee}	$[^{\circ}C]$	Temperatur der Schneedecke
T_{Luft}	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur
v_{Wind}	$[m/s]$	Windgeschwindigkeit
w_{latent}	$[W/m^2]$	Strom latenter Wärme (Verdunstung, Kondensation, Sublimation)
e_{Schnee}	$[hPa]$	Wasserdampfdruck an der Schneeoberfläche
e_{scr}	$[hPa]$	Wasserdampfdruck in der Luft

Potentielle Schneeschmelze

5) Turbulenter Strom latenter Wärme:

$$W_{latent} = (a_0 + a_1 \cdot v_{Wind}) \cdot 1,76 \cdot (e_{scr} - e_{Schnee})$$



W_{latent} [W/m²]

*Strom latenter Wärme
(Verdunstung, Kondensation, Sublimation)*

e_{Schnee} [hPa]

Wasserdampfdruck an der Schneeoberfläche

e_{scr} [hPa]

Wasserdampfdruck in der Luft (ermittelt aus rel. Feuchte)

1,76 [°C/hPa]

Kehrwert der Psychrometerkonstante über Eis bzw. Schnee (Knauf 1980)

a_0 [W/(m² °C)]

Konstante im turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,5 - 3,5 W/(m² °C)

a_1 [J/(m³ °C)]

Konstante zur Berechnung des windabhängigen Terms des turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,8 - 2,5 J/(m³ °C)

Potentielle Schneeschmelze

5) Turbulenter Strom latenter Wärme:

Annahme: Lufttemperatur an Schneeoberfläche gleich der Schneetemperatur und Luft wasserdampfgesättigt. Berechnung des Wasserdampfdrucks an der Schneeoberfläche nach DVWK 1996:

$$e_{Schnee} = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{22,46 \cdot T_{Luft}}{272,62 \cdot T_{Luft}}\right)$$

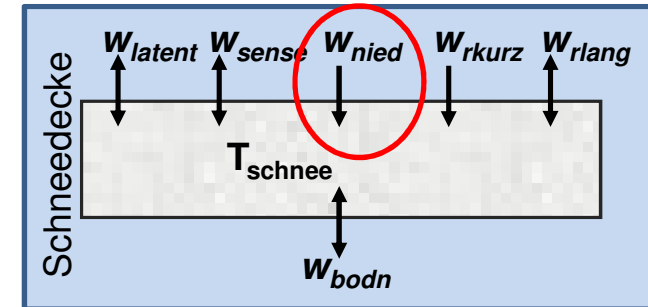
e_{Schnee} [hPa] *Wasserdampfdruck an der Schneeoberfläche*

Auch der turbulente Wasserdampfaustausch an der Schneeoberfläche wird bei Waldstandorten durch die Verringerung der Windgeschwindigkeit (Windfaktor F_{wind}) abgeschwächt.

Potentielle Schneeschmelze

6) Eingetragene Wärme aus Niederschlag:

$$W_{nied} = \frac{N \cdot T_{nied} \cdot cp_{wasser}}{ta \cdot 3600}$$



W_{nied}	$[W/m^2]$	Wärmestrom durch Niederschlag
N	$[mm]$	Niederschlagsmenge im Zeitschritt (entspricht $[kg/m^2]$) (aus Messung)
T_{nied}	$[^{\circ}C]$	Temperatur des flüssigen Niederschlags (Differenz zu $0^{\circ}C$)
cp_{wasser}	$[J/(kg \ ^{\circ}C)]$	Wärmekapazität von flüssigem Wasser, programminterne Konstante nach DWD 1987: $4186,8 J/(kg \ ^{\circ}C)$
ta	$[h]$	Rechenschrittweite

Bei Schneeniederschlag: Schneetemperatur von $0^{\circ}C$ (keine Erhöhung des „Kälteinhalts“ der Schneedecke).

Potentielle Schneeschmelze

6) Eingetragene Wärme aus Niederschlag:

Im Regelfall wird dem flüssigen Niederschlag die aktuelle Lufttemperatur zugewiesen:

$$T_{nied} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} T_{Luft} \\ 0 \end{array} \right\}$$

T_{Luft} [°C] Lufttemperatur (aus Messung)

Bei Option <T GR. AUCH S-SCHMELZ>:

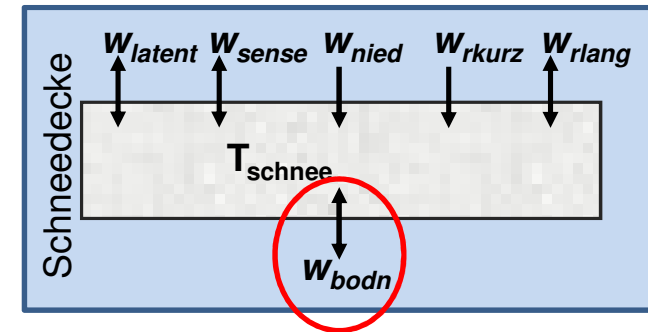
$$T_{nied} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} T_{Luft} - T_{gr} \\ 0 \end{array} \right\}$$

T_{gr} [°C] Grenztemperatur für den Übergang von Schnee in Regen (Kalibriergröße)

Potentielle Schneeschmelze

7a) Statischer Bodenwärmestrom:

$$W_{\text{bodn}} = \frac{i_b \cdot r_{\text{schmelz}}}{3600}$$



W_{bodn} [W/m²] Bodenwärmestrom

i_B [mm/h] Parameter des Bodenwärmestroms, Wertebereich nach Knauf zwischen 0,01 mm/h und 0,05 mm/h

r_{schmelz} [J/kg] Schmelzwärme des Wassers (programminterne Konstante nach DWD 1987: 334000 J/kg)

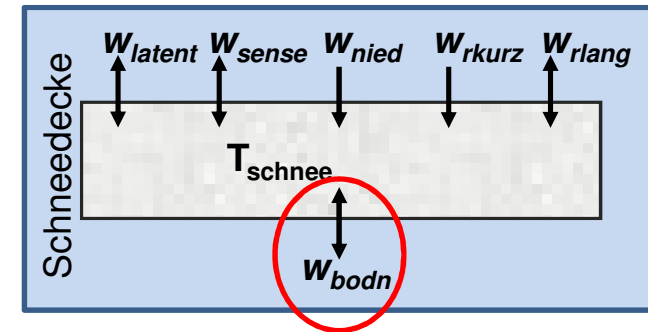
Quotient 3600: Umrechnungsfaktor von Stunden auf Sekunden (somit von J/h/m² in W/m² (mit Annahme Dichte flüssiges Wasser: 1 kg/l)).

Der Parameter i_B wird in LARSIM standardmäßig auf 0,03 gesetzt. Bei Option <EINGABE KNAUF-PARAMETER> kann i_B als Kalibriergröße verwendet werden.

Potentielle Schneeschmelze

7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Der Bodenwärmestrom ist außer für die Schneeschmelze auch durch eine mögliche „Frost-Versiegelung“ des Bodens für die Abflussbildung relevant.



Die oberste Bodenschicht kann vereinfacht in der Energiebilanz mit betrachtet werden. Somit ergibt sich ein Temperaturgradient zwischen oberem Boden und Schneedecke → dynamische Simulation des Bodenwärmestroms.

Zudem wird der Anteil des gefrorenen Bodenwassers am Gesamtwassergehalt der oberflächennahen Bodenschicht berechnet.

- Option BODENTEMPERATUR
- Einzelparameter FROST-VERSIEGEL-FAK

Potentielle Schneeschmelze

7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Vereinfachte dynamische Berechnung des Bodenwärmestroms für oberflächennahes Bodenvolumen:

$$W_{bodn} = -\lambda_{bodn} \cdot \frac{T_0 - T_z}{z} \cdot \Delta t$$

W_{bodn} [W/m²] Bodenwärmestrom

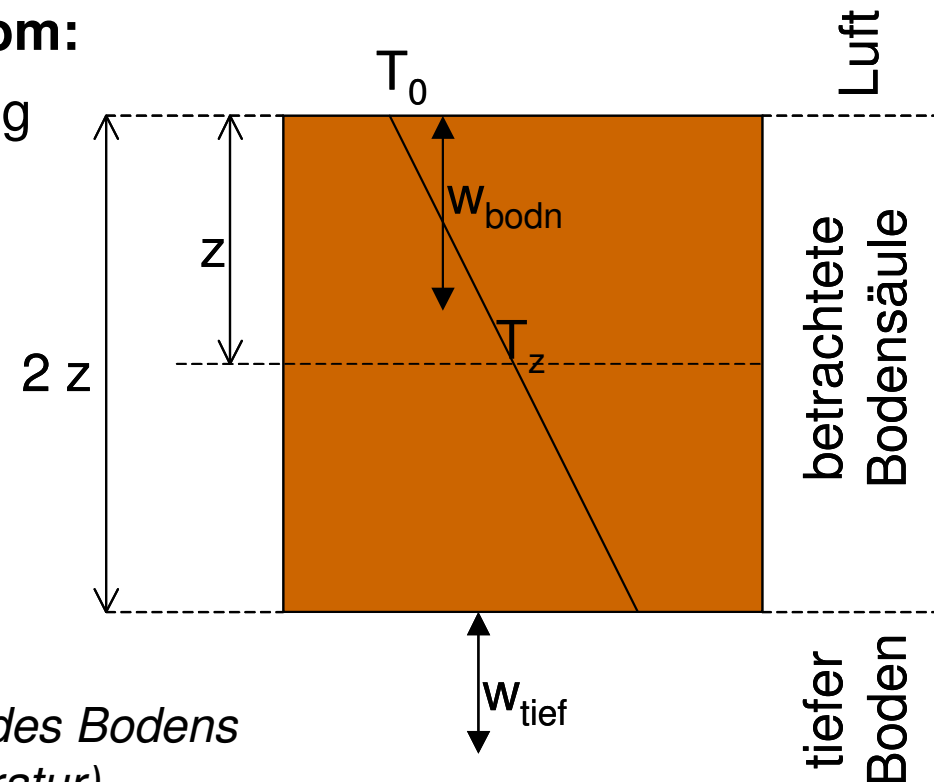
λ_{bodn} [W/(m °C)] Wärmeleitfähigkeit des Bodens
(Mittelwert aus Literatur)

T_z [°C] Mittlere Bodentemperatur

T_0 [°C] Temperatur der Bodenoberfläche (Luft- oder Schneetemperatur)

W_{tief} [W/m²] Wärmestrom vom tieferen Untergrund

z [cm] Oberflächennahe Schicht $2z = 20$ cm



Potentielle Schneeschmelze

7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

- Energiegehalt der Bodenschicht E_{bodn} ergibt sich aus $w_{bodn} + w_{tief}$:

$$E_{bodn}^t = E_{bodn}^{t-1} + W_{bodn} + W_{tief}$$

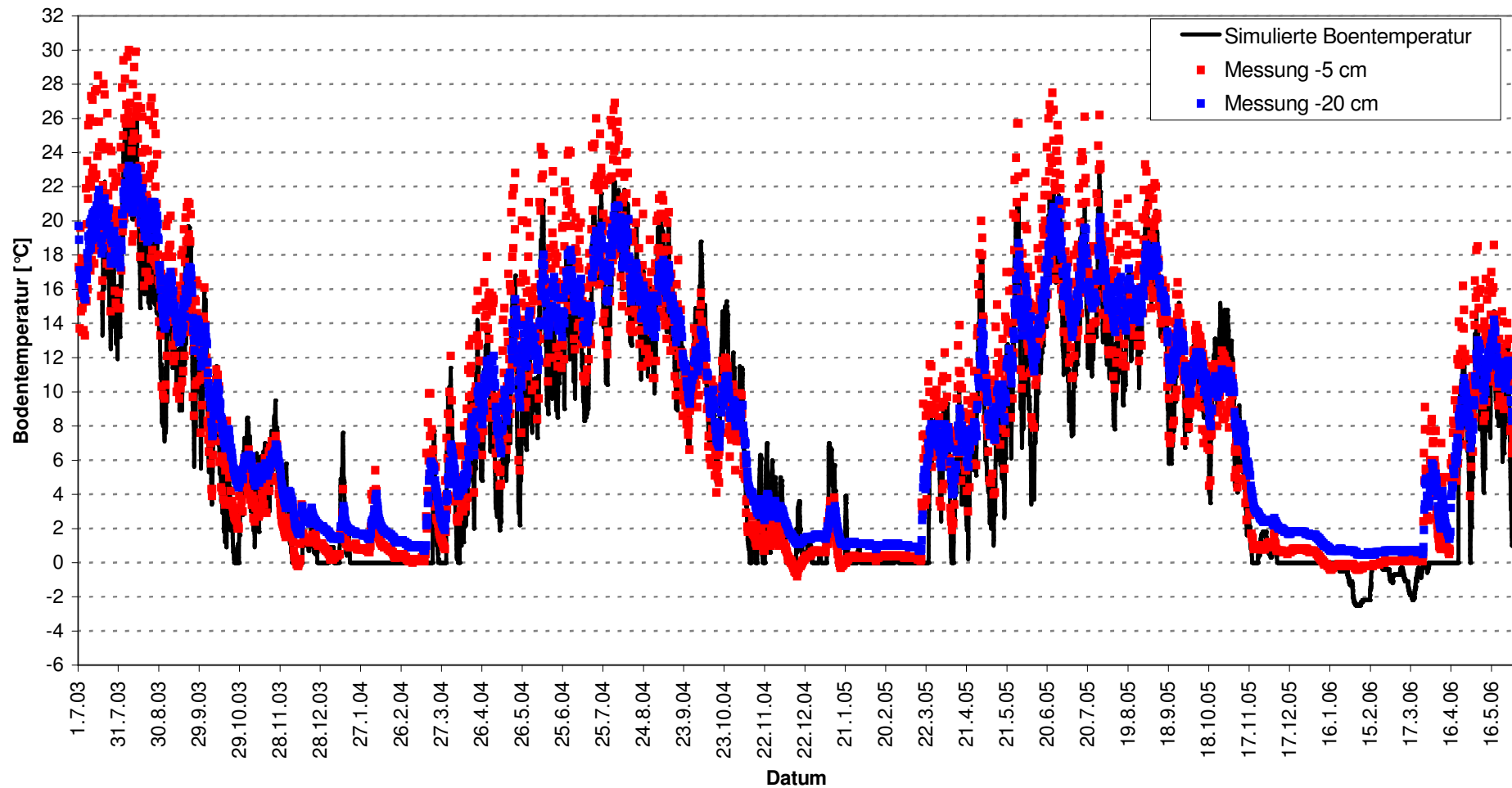
- Wärmestrom aus tiefer Schicht w_{tief} nach MORECS (mittlere Werte der Wärmespeicherung im Boden für die Monate Jan. bis Dez.)
- Wenn Energiegehalt $< 0 \text{ J/m}^2$: Bodentemperatur $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$, Bodenwasser gefroren.
- Mit Energiegehalt
 - + Wärmekapazität des Bodens
 - + Gefrieren und Tauen des Bodenwassers
 - T_z (Mittlere Bodentemperatur)
 - SFF (Anteil des gefrorenen Wassers am gesamten Bodenwasser)
- So ermittelter Wert für w_{bodn} wird in Schneemodell verwendet
 - SFF kann für Berechnung der Frost-Versiegelung verwendet werden

Potentielle Schneeschmelze

7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Validierung anhand gemessener Bodentemperatur:

Klippeneck



Potentielle Schneeschmelze

7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Anteil gefrorenes Bodenwasser (SFF)

→ Mögliche Wirkung der Frostversiegelung

Wirkung ?

Wenn, dann nur wenige Ereignisse (Ausmaß der Bodengefrorenis hängt maßgeblich vom Vorhandensein, der Zeitdauer und der Mächtigkeit einer Schneedecke ab).

Oberflächennahe Bodengefrorenis aufgrund zahlreicher Einflüsse (z.B. Vegetationsbedeckung) räumlich sehr heterogen verteilt.

- Steuerung über Einzelparameter

FROST-VERSIEGEL-FAK *f_{vf}*

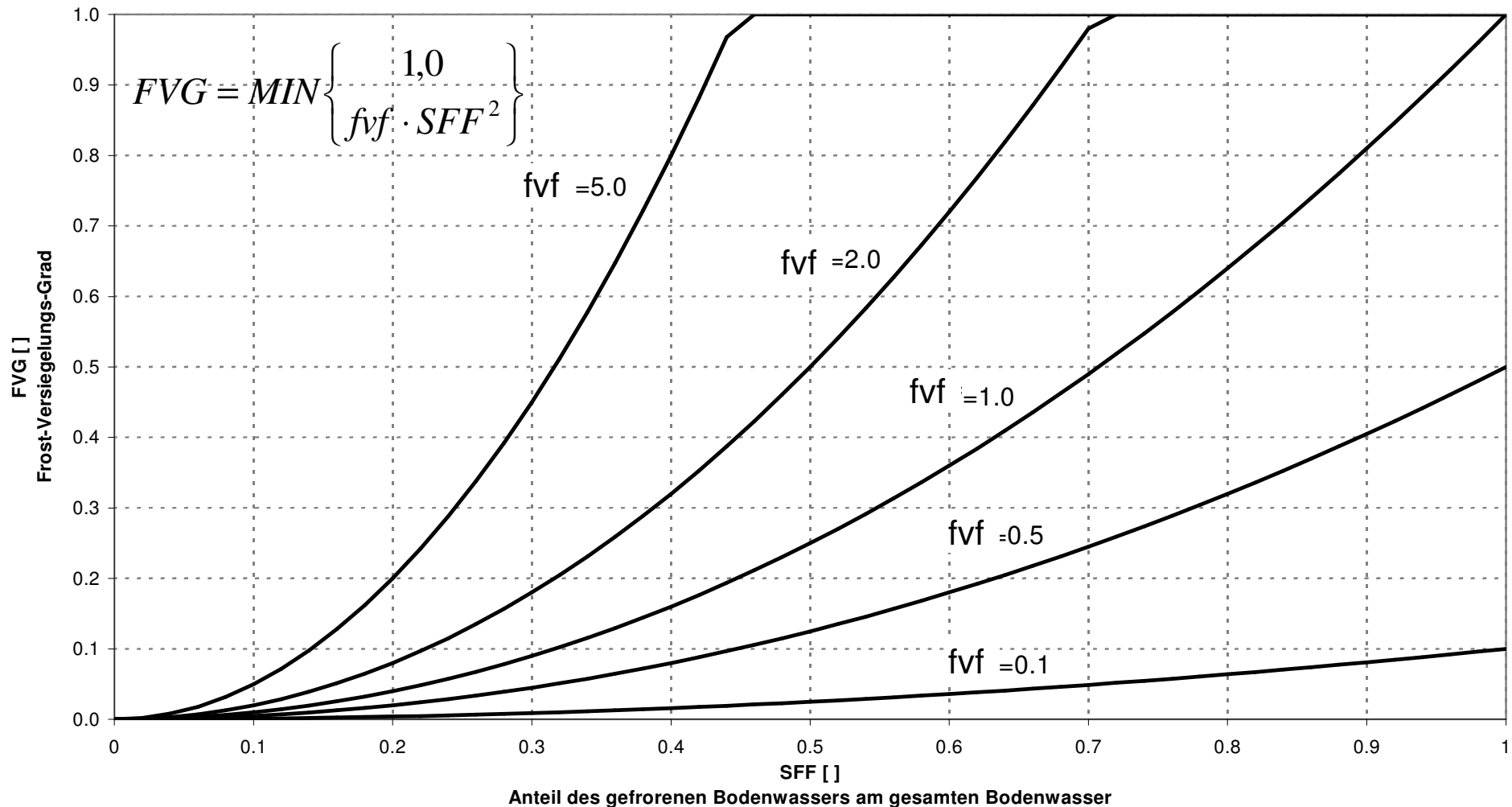
$f_{vf} = 0$ → Keine Frostversiegelung bei Abflussbildung

$f_{vf} > 0$ → Mehr Direktabfluss bei gefrorenem Boden

Potentielle Schneeschmelze

7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

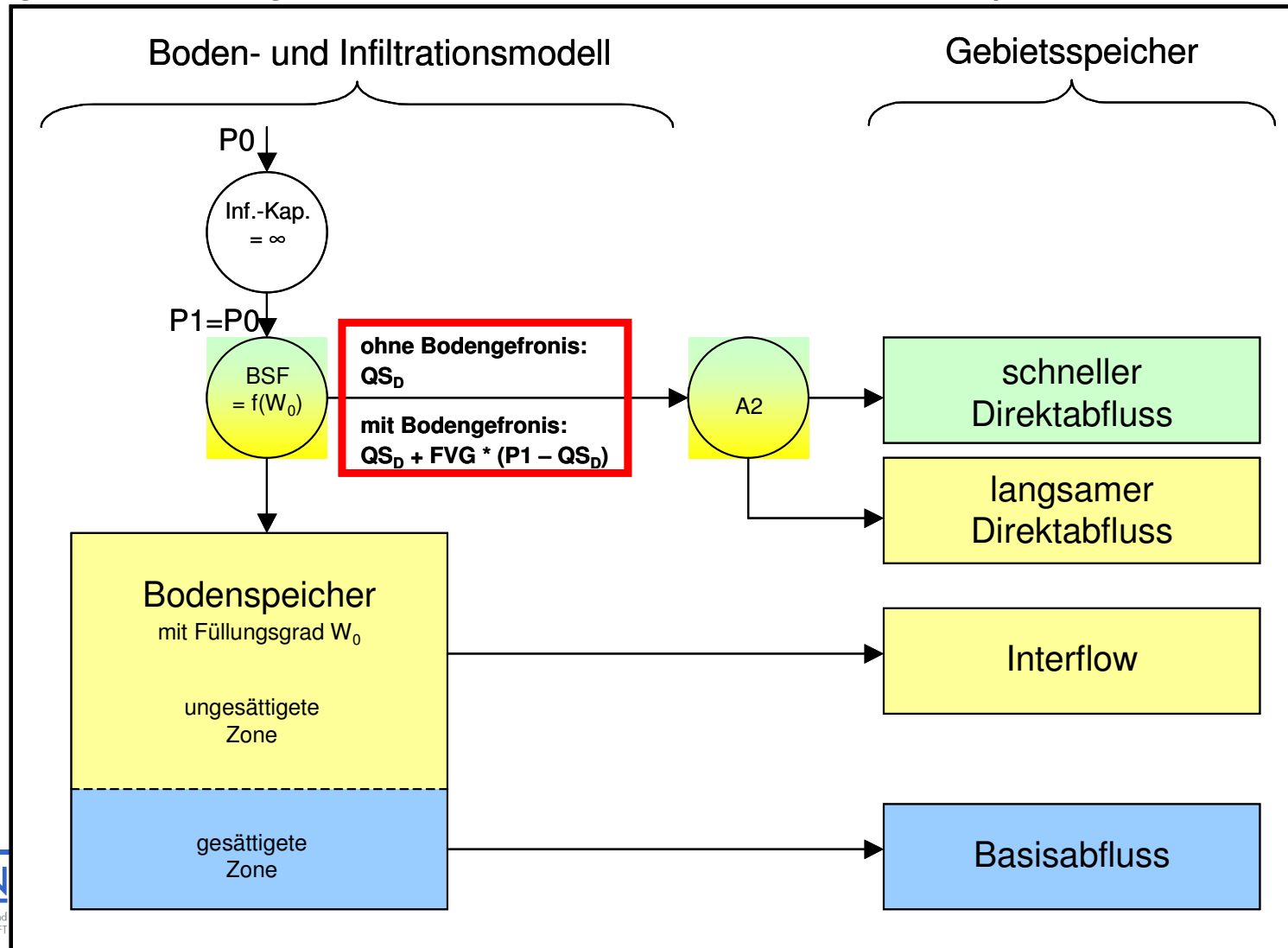
Versiegelungsgrad = f(Anteil gefrorenem Bodenwasser) für unterschiedliche fvf



Potentielle Schneeschmelze

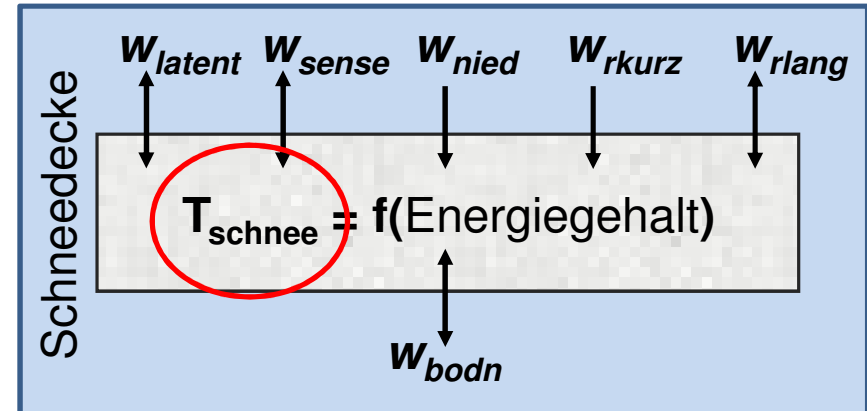
7b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Wirkung der Bodengefrorenis bei einem vier Abflusskomponenten-Modell



Potentielle Schneeschmelze

8) Berechnung der Schneetemperatur



Potentielle Schneeschmelze

8) Berechnung der Schneetemperatur

Berechnung des sogenannten Kälteinhalt der Schneedecke des vorangegangenen Berechnungsschritts t (benötigte Energie, um Schneedecke auf 0°C zu erwärmen):

$$w_{\text{speicher}}^t = \frac{[W\ddot{A}_{TS} \cdot cp_{\text{eis}} + (W\ddot{A}_{\text{ges}} - W\ddot{A}_{TS}) \cdot cp_{\text{wasser}}] \cdot T_{\text{Schnee}}^t}{t_a \cdot 3600}$$

w_{speicher} [W/m^2] Kälteinhalt der Schneedecke

$W\ddot{A}_{TS}$ [mm] Wasseräquivalent des trockenen Schnees

$W\ddot{A}_{\text{ges}}$ [mm] Wasseräquivalent der gesamten Schneedecke

cp_{eis} [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$] Wärmekapazität von gefrorenem Wasser (programminterne Konstante nach DWD 1987: $cp_{\text{eis}} = 2090 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$)

cp_{wasser} [$\text{J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$] Wärmekapazität von flüssigem Wasser, programminterne Konstante nach DWD 1987: $4186,8 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$

Der Kälteinhalt ist immer negativ (bzw. maximal 0), da Energie zugeführt werden muss.

Potentielle Schneeschmelze

8) Berechnung der Schneetemperatur

Berechnung des aktuellen Kälteinhalts (Berechnungszeitschritt t+1) unter Einbeziehung der Energiebilanz der Schneedecke

$$w_{\text{speicher}}^{t+1} = \text{MIN} \left\{ \begin{array}{c} w_{\text{speicher}}^t + w_{\text{input}} \\ 0 \end{array} \right\}$$

Daraus wird die aktuelle Schneetemperatur berechnet:

$$T_{\text{Schnee}}^{t+1} = \frac{w_{\text{speicher}}^{t+1} \cdot t_a \cdot 3600}{W\ddot{A}_{TS} \cdot cp_{\text{eis}} + (W\ddot{A}_{\text{ges}} - W\ddot{A}_{TS}) \cdot cp_{\text{wasser}}}$$

w_{speicher} [W/m²] Kälteinhalt der Schneedecke

$W\ddot{A}_{TS}$ [mm] Wasseräquivalent des trockenen Schnees

$W\ddot{A}_{\text{ges}}$ [mm] Wasseräquivalent der gesamten Schneedecke

cp_{eis} [J/(kg °C)] Wärmekapazität von gefrorenem Wasser

cp_{wasser} [J/(kg °C)] Wärmekapazität von flüssigem Wasser

Potentielle Schneeschmelze

9) Energie für die Schneeschmelze

Wird im aktuellen Zeitschritt mehr Energie zugeführt als für die Erwärmung der Schneedecke auf 0°C erforderlich ist ($w_{\text{Speicher}}^t + w_{\text{input}} > 0$), steht die verbleibende Energie für die potentielle Schneeschmelze zur Verfügung:

$$w_{\text{schmelz}} = \text{MAX} \left\{ \begin{array}{c} w_{\text{speicher}}^t + w_{\text{input}} \\ 0 \end{array} \right\}$$

w_{schmelz} [W/m²] *Für die potentielle Schneeschmelze zur Verfügung stehende Energie*

Potentielle Schneeschmelze

10) Potentielle Schneeschmelze

Die für die potentielle Schneeschmelze verfügbare Energie wird abschließend in mm Wasseräquivalent umgerechnet:

$$p_{melt} = \frac{W_{schmelz} \cdot ta \cdot 3600}{r_{schmelz}}$$

p_{melt}	[mm]	Potentielle Schneeschmelze im aktuellen Berechnungsschritt
$r_{schmelz}$	[J/kg]	Schmelzwärme des Wassers (programminterne Konstante)

Potentielle Schneeschmelze

11) Verdunstung:

Die Verdunstung und Sublimation von Schnee kann unter speziellen meteorologischen Bedingungen durchaus einen deutlichen Einfluss auf den Wasserhaushalt einer Schneedecke haben. Da die Schneeverdunstung auch in den mitteleuropäischen Gebirgsregionen bei Strahlungswetterlagen im Frühjahr eine Rolle spielen kann, kann sie in LARSIM mit der Option SCHNEE-VERDUNSTUNG erfasst werden.

Bei Verwendung der Option SCHNEE: KNAUF, 2006 wird die Schnee- verdunstung automatisch mit berücksichtigt

Die potentielle Schneeschmelze findet überwiegend an der Grenzschicht Schnee/Atmosphäre statt. Das geschmolzene Wasser kann von hier verdunsten. Die Berechnung der Verdunstung von Schmelzwasser erfolgt nach der Formel von Knauf (1980).

Potentielle Schneeschmelze

11) Verdunstung:

$$V = -1/rV \cdot (a_0 + a_1 \cdot v) \cdot 1,76 \cdot (e_{scr} - 6,1)$$

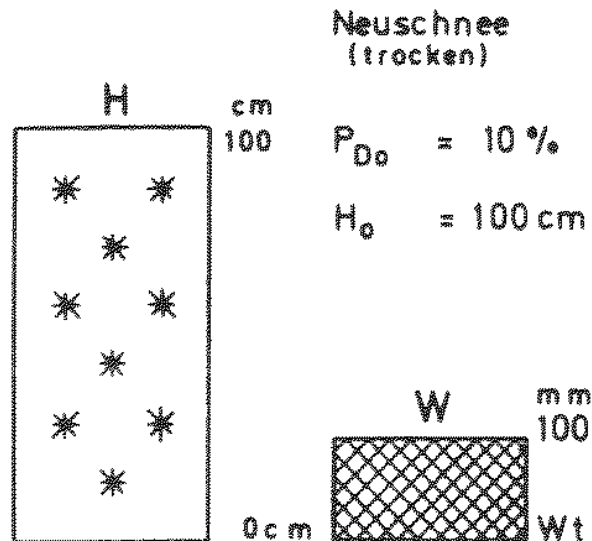
V	[mm/h]	Verdunstung
rV	[Wh/kg]	Verdunstungswärme von Wasser bei 0 °C nach Baumgartner & Liebscher (1990)
e_{scr}	[hPa]	Wasserdampfdruck in der Luft (ermittelt aus rel. Feuchte)
1,76	[°C/hPa]	Kehrwert der Psychrometerkonstante über Eis bzw. Schnee (Knauf 1980)
a_0	[W/(m ² °C)]	Konstante im turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,5 - 3,5 W/(m ² °C)
a_1	[J/(m ³ °C)]	Konstante zur Berechnung des windabhängigen Terms des turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,8 - 2,5 J/(m ³ °C)

Potentielle Schneeschmelze

Berechnungsbeispiel:

Potentielle Schneeschmelze

a) Ausgangszustand



Schneehöhe Wasseräquivalent

$$P_D = P_{D0} \quad W_t = 100\text{ mm}$$

$$H = 100\text{ cm}$$

$$P_D = \frac{W_{akk}}{H} \cdot 100 = 100\%$$

$$P_t = \frac{W_t}{H} \cdot 100 = 10\%$$

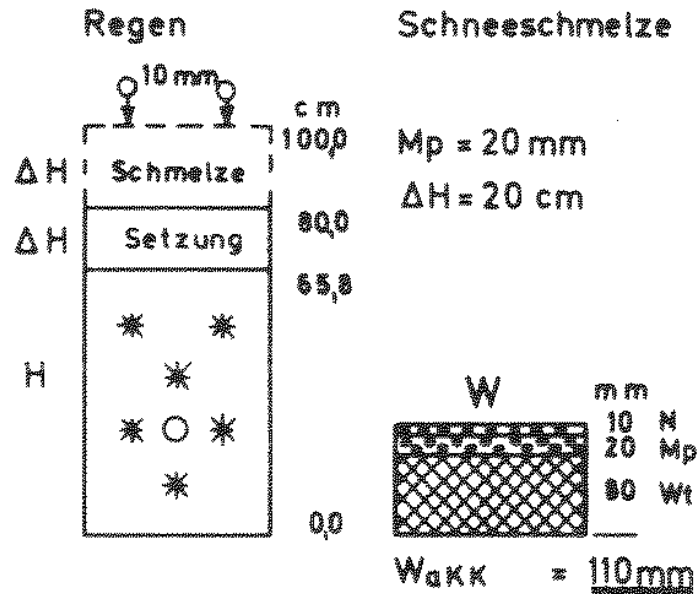
Knauf 1980

- compacité neige sèche (= densité neige fraîche), plage de valeurs 5 % - 20 %, ici : $P_t = 10\%$
- hauteur de neige : $H = 100\text{ cm}$
- équivalent en eau : $W = 100\text{ mm} (= W_{akk} = W_t)$
- taux d'humidité : $W_f = 0\%$

- Lagerungsdichte Trockenschnee (=Neuschneedichte), Wertebereich 5 % - 20 %, hier: $P_t = 10\%$
- Schneehöhe: $H = 100\text{ cm}$
- Wasseräquivalent: $W = 100\text{ mm} (= W_{akk} = W_t)$
- Feuchtegehalt: $W_f = 0\%$

Potentielle Schneeschmelze

b) Umwandlungsphase



$$P_W = \frac{W_{akk}}{W_t} \cdot 100 = 137,5\%$$

$$P_H = 82,23\% \quad (\text{Gl. 7})$$

$$H = 0,822 \cdot 80 = 65,8 \text{ cm}$$

$$P_D = \frac{W_{akk}}{H} \cdot 100 = 16,7\%$$

$$P_t = \frac{W_t}{H} \cdot 100 = 12,16\%$$

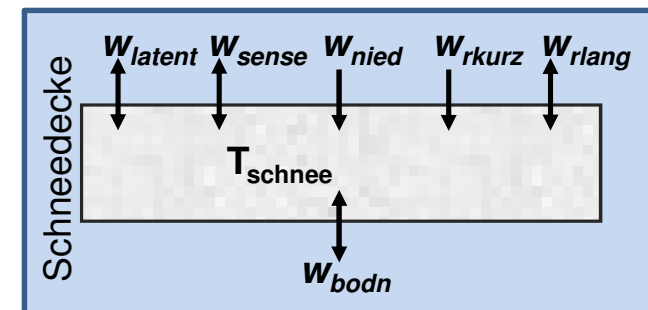
- taux de fonte potentielle par chaleur : $M_p = 20 \text{ mm}$
- avec apport de pluie : $N = 10 \text{ mm}$
 - teneur en eau momentanée : $W_{akk} = 110 \text{ mm}$
 - eau libre : $W_f = 30 \text{ mm}$
- équivalent en eau accumulée dans la couverture de neige $P_W = 110 \text{ mm} / 80 \text{ mm} = 137,5\%$

- Potentielle Schmelzrate aus Wärme: $M_p = 20 \text{ mm}$
- Zudem Regen: $N = 10 \text{ mm}$
 - Aktueller Wassergehalt: $W_{akk} = 110 \text{ mm}$
 - Freies Wasser: $W_f = 30 \text{ mm}$
- Akkumuliertes Wasseräquivalent in Schneedecke: $P_W = 110 \text{ mm} / 80 \text{ mm} = 137,5\%$

Potentielle Schneeschmelze

Zusammenfassung:

- Berechnung der potentiellen Schneeschmelze in LARSIM unter Berücksichtigung folgender Glieder der Energiebilanzgleichung:
 - Dynamische Berechnung der Albedo als Funktion der Alterung der Schneedecke (Parameter $Abso$)
 - Kurzwellige Strahlungsbilanz (Parameter $Abso$)
 - Langwellige Strahlungsbilanz
 - Turbulenter Strom fühlbarer Wärme (Parameter $a0$ und $a1$)
 - Turbulenter Strom latenter Wärme (Parameter $a0$ und $a1$)
 - Eingetragene Wärme aus Niederschlag
 - Statischer Bodenwärmestrom (Parameter i_B)
 - Dynamischer Bodenwärmestrom (Parameter fvf für Frostversiegelung)



Potentielle Schneeschmelze

Zusammenfassung:

- Berechnung der potentiellen Schneeschmelze in LARSIM unter Berücksichtigung des Einflusses des Waldes auf Strahlung und Windgeschwindigkeit.
- Berechnung der Schneetemperatur
- Energie für die Schneeschmelze
- ➔ Berechnung der potentiellen Schneeschmelze

Potentielle Schneeschmelze

Zitierte Unterlagen:

- Baumgartner, A. & Liebscher, H. (1990): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1: Quantitative Hydrologie. - Verlag Gebr. Borntraeger, Berlin - Stuttgart.
- Bergplus (2011): Aufbau der Schneedecke. - <http://www.bergplus.ch/pdf/schneedecke.pdf>
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238.
- DWD (1987): Allgemeine Meteorologie. 3. Auflage; Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.
- Knauf D. (1980): Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke. - In: DVWK-Schriften, Heft 46, 95-135.
- Tarboton D. G. & Luce C. H. (1996): Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model (UEB). - Utah Water Research Laboratory und USDA Forest Service.